

УДК 621.327.535

В. К. Свешников, докт. техн. наук,
В. Н. Куплинов, канд. техн. наук
 Мордовский государственный
 педагогический институт
 им. М. Е. Евсевьева

МЕТОД РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ОБЛАСТИ КОЛБ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

В настоящее время наблюдается тенденция расширения выпуска и номенклатуры энергоэкономичных источников света, в частности люминесцентных ламп. Совершенствование конструкции ламп требует изыскания более точных методов их расчёта.

Одной из важнейших характеристик люминесцентных ламп является температура колбы, поскольку она определяет выбор материала, давление паров, от которого зависят все параметры разряда. Поэтому разработка методов расчёта температурных полей колб люминесцентных ламп является актуальной задачей. В общем случае, температурные поля могут быть найдены путём решения уравнений теплового баланса с соответствующими начальными и граничными условиями.

Общее уравнение трёхмерного нестационарного температурного поля оболочки с неравномерно распределёнными объёмными источниками истоками тепла имеет вид [1]:

$$C_V \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \omega_{\text{НАГР}}(r,t) - \omega_{\text{ОХЛ}}(r,T,t), \quad (1)$$

где C_V – удельная объёмная теплоёмкость материала колбы, в общем случае зависящая от координат r и температуры; λ – коэффициент теплопроводности, в общем случае зависящий от координат и от температуры; $\omega_{\text{НАГР}}$ – объёмная плотность мощности нагрева в точке r в момент времени t не за счёт теплопроводности материала колбы, а, например, за счёт поглощения излучения; $\omega_{\text{ОХЛ}}$ – то же охлаждения.

В стационарном режиме ($dT/dt = 0$) задача сводится к решению уравнения вида

$$\text{div}(\lambda \text{grad} T) = \omega_{\text{ОХЛ}} - \omega_{\text{НАГР}} \quad (2)$$

с различными граничными условиями.

В реальных лампах всегда наблюдается неравномерность распределения температуры по поверхности колбы, которая зависит от неравномерности нагрева и других факторов. Строгое решение уравнения баланса с учётом всех этих обстоятельств очень затруднительно и может быть выполнено только на ЭВМ путём численного решения конечно – разностной системы уравнений при задании начальных и граничных условий.

Часто при нахождении температуры прибегают к упрощениям, которые позволяют свести к минимуму сложность нахождения распределения температуры на поверхности ламп.

Так ранее, нами был предложен приближенный оценочный метод расчета распределения температуры на поверхности колбы в приэлектродной области [2], в котором не учитывалось передача тепла вдоль поверхности колбы за счёт теплопроводности стекла колбы. Температура на поверхности колбы в данном методе находилась исходя из решения уравнения теплового баланса:

$$\frac{\Phi_e \cos \beta + P_r}{4\pi r^2} = A_B d_k^{-0.25} (T_c - T_o)^{1.25} + \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_o^4), \quad (3)$$

где Φ_e и P_r – мощности, учитывающие нагрев колбы тепловым излучением катода и теплопроводностью от катода к колбе через наполняющий колбу газ.

В дальнейшем расчёт нами был уточнён [3] учётом передачи тепла вдоль поверхности колбы за счёт теплопроводности стекла.

При этом расчёт распределения температуры в приэлектродной области проводился при следующих допущениях:

- в силу малой толщины колбы её температура одинакова по толщине в одном и том же месте;
- охлаждение колбы происходит только снаружи;
- катодное пятно находится на оси OZ лампы, поэтому температура на её поверхности по окружности в любом сечении одинакова, и можно рассматривать линейную геометрию нагрева и охлаждения;
- в качестве излучающего тепло элемента принята площадь поверхности шара.

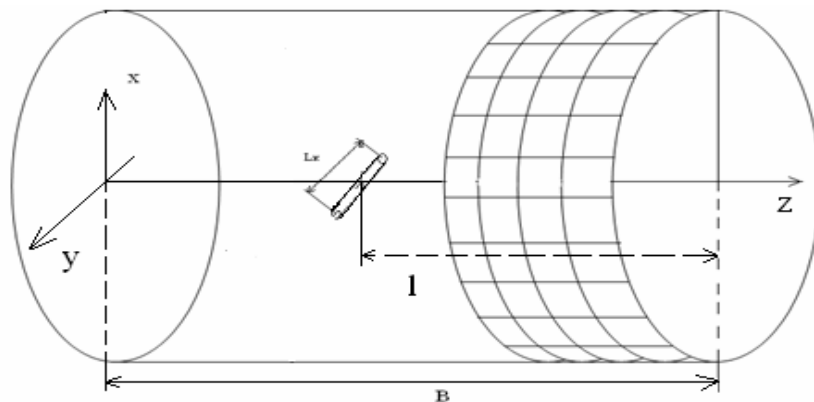


Рис.1 - Разбиение колбы лампы на зоны при расчёте температуры.

При расчёте приэлектродная область колбы шириной B представлялась в виде совокупности узлов, которые расположены на расстоянии Δz друг от друга. Площадь S , через которую распространяется вдоль стеклянной стенки тепловой поток, представлялась как произведение $\Delta y \Delta x$.

При этом баланс энергии для нулевого узла записывался в виде:

$$q_{1 \rightarrow 0} + q_{1' \rightarrow 0} + q_{\infty \rightarrow 0} + q_{G_0} = 0. \quad (4)$$

где слагаемые $q_{1 \rightarrow 0}$ и $q_{1' \rightarrow 0}$ выражают кондуктивный тепловой поток в стекле; $q_{\infty \rightarrow 0}$ – тепловой поток от окружающей среды к нулевому узлу, q_{G_0} – тепловыделение в узле.

Аналогичным образом записывались выражения для других узлов и первые два члена в этих уравнениях заменялись конечно-разностными аппроксимациями закона Фурье.

Например, для 0-го узла уравнение приводилось к следующему виду:

$$\lambda \cdot \Delta y \cdot \Delta x \frac{T_1 - T_0}{\Delta z} + \lambda \cdot \Delta y \cdot \Delta x \frac{T'_1 - T_0}{\Delta z} + q_{\infty \rightarrow 0} + q_{G_0} = 0 \quad (5)$$

где λ - коэффициент теплопроводности стекла; T_0 - температура в нулевом узле; T_1 - температура в 1-ом узле; T'_1 - температура в 1'-ом узле.

Численное решение системы уравнений (5), записанных для n узлов, дают распределения температуры на поверхности колб люминесцентных ламп в приэлектродной области.

Результаты проведенного расчета распределения температуры на поверхности колбы ЛЛ этим способом приведены на рисунке.

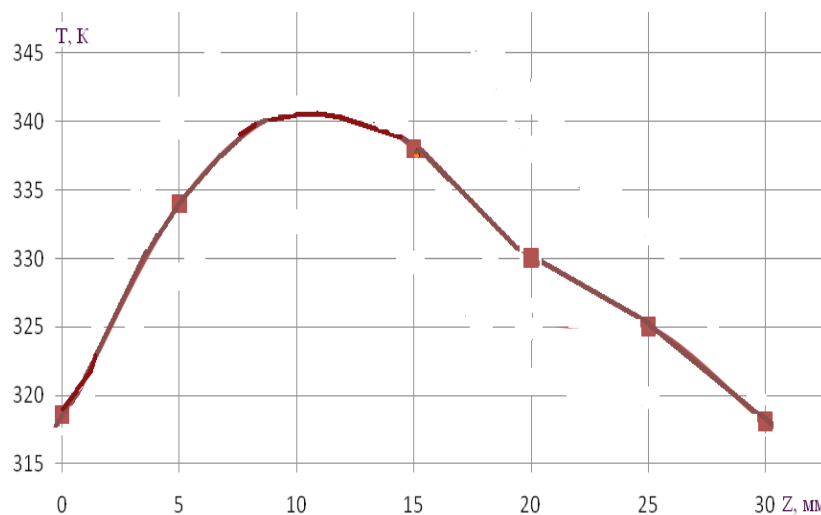


Рис.2 - Распределение температуры на поверхности ЛЛ в приэлектродной области, полученное для значения температуры окружающей среды $T=290$ К.

Следует отметить, что полученные расчетные данные в этом методе хорошо согласуются с экспериментальными данными по распределению температуры на колбах ЛЛ, взятыми из [1].

Но в реальных условиях катодное пятно смещено относительно оси лампы на некоторое расстояние, поэтому температура на поверхности лампы меняется не только по длине лампы, но и по окружности в любом сечении приэлектродной области.

Это приводит к тому, что теплопередача, обусловленная теплопроводностью стекла, происходит на колбе не только вдоль её оси, но и вдоль окружности в любом сечении приэлектродной области от более нагретых узлов к менее нагретым.

В этом случае при расчёте температуры удобнее перейти к цилиндрической симметрии и решать уравнение теплопроводности в виде:

$$\lambda S \left(\frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{1}{R^2} \frac{d^2 T}{d\varphi^2} \right) = Q_{\text{охл}} - Q_{\text{наг}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{охл}}$ и $Q_{\text{наг}}$ - соответственно удельные (на единицу площади) мощности охлаждения и нагрева; λ - коэффициент теплопроводности стекла; S - площадь поперечного сечения оболочки.

Для решения данного уравнения, как и в предыдущем случае, нами использовались конечно-разностные схемы.

$$\frac{d^2 T}{dz^2} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h_1^2}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{R^2} \frac{d^2 T}{d\varphi^2} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{R^2 \Delta\varphi^2} \quad (8)$$

Температура в области положительного столба разряда имеет практически постоянное значение для конкретного типа ламп. Исходя из этого температуру на границе участка колбы в приэлектродной области также можно считать постоянной и равной T_0 . Таким образом, в качестве краевых условий можно задать следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\varphi} \Big|_{z=l} = 0 \\ \lambda S \frac{dT}{dz} \Big|_{z=l} + Q_{\text{нар}} R \Delta\varphi \Delta z = Q_{\text{охл}} R \Delta\varphi \Delta z \end{cases} \quad (9)$$

где $l = B/2$; $z = l$ – координата, соответствующая границе приэлектродной области со стороны положительного столба разряда; $R \Delta\varphi \Delta z$ – участок ΔS поверхности колбы в приэлектродной области.

Применяя конечно-разностные схемы к граничным условиям определяются температуры всех зон на границе приэлектродной области с областью положительного столба разряда.

Затем используя найденные значения температуры на границе, решая систему уравнений (6), определяются температуры зон в следующей области, и так далее.

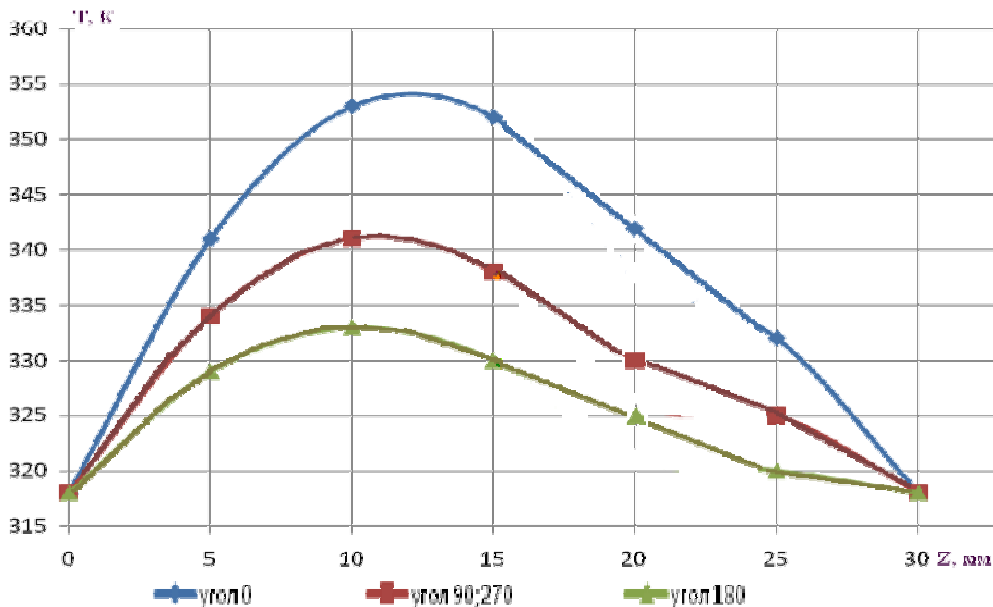


Рис. 3 - Распределение температуры в приэлектродной области при температуре окружающей среды $T=290$ К (угол 0 – соответствует образующей на цилиндрической оболочке лампы, наиболее близкой к катодному пятну).

Как и следовало ожидать, рассчитанные этим способом значения температуры на поверхности лампы в приэлектродной области наилучшим образом совпадают с экспериментальными значениями, так как последняя модель расчета наиболее близка к

реальности. Предложенный метод расчёта может быть использован при проектировании и совершенствовании конструкции люминесцентных ламп.

Литература:

1. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
2. Куплинов В. Н. Расчёт температуры в приэлектродной области колбы люминесцентной лампы/ В. Н Куплинов, Е.Г. Алексеев, В.И Королёв. Источники излучения: межвуз. сб. науч. работ/ Под ред. В. К. Свешникова: Саранск.: МГПИ им. М. Е. Евсевьева.– С. 65 – 72.
3. Куплинов В. Н. Расчёт распределения температуры в приэлектродной области колб люминесцентных ламп с учетом теплопроводности стекла// V Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики/ под ред. д.т.н., профессора В.К. Свешникова; Мордов. гос. пед. ин-т. - Саранск, 2009. - С. 239-242.

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ В ПРИЕЛЕКТРОДНОЇ ОБЛАСТІ КОЛБ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ЛАМП

В. К. Свешніков, В. М. Куплінов

Наведена методика розрахунку температури на поверхні люмінесцентних ламп в приелектродній області, а також проводиться порівняння результатів, отриманих цим методом з відомими даними.

A METHOD OF CALCULATION OF TEMPERATURE IS IN PRIELEKTRODNOY OF AREA OF RETORTS OF LUMINESCENT LAMPS

V. Sveshnikov, V. Kuplinov

A method over of calculation of temperature is brought on-the-spot luminescent lamps in a prielektrodney area, and also comparison of results, got this method with the known information is produced.